

استفاده از روش معکوس برای طراحی حرارتی یک اتاق مسکونی، به منظور ایجاد شرایط آسایش حرارتی

غلامرضا ایمانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

مهدی معرفت (دانشیار)

دانشکده فنی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

فرشاد کوثری (دانشیار)

دانشکده فنی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

سیدعلیرضا ذوالفقاری (دانشجوی دکتری)

دانشکده فنی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

در تحقیق حاضر از روشی جدید برای طراحی حرارتی محیط زندگی انسان استفاده شده است. هدف این تحقیق استفاده از روش معکوس برای تعیین دمای دیوارها و دمای هوای یک اتاق مسکونی یک نفره به منظور ایجاد شرایط آسایش حرارتی^۱ است. این روش را که با یک سیستم معادلات بدووضع^۲ توصیف می شود، «مدل سازی معکوس^۳» می نامند. در این کار برای خوش وضع^۴ کردن دستگاه معادلات ذکر شده از روش «منظم سازی تیخونوف^۵» استفاده شده است. استفاده از روش معکوس منجر به تعیین شرایط مطلوب حرارتی (دمای دیوارها و دمای هوا) در اطراف شخص شده و این شرایط، با قیود خطا و یکنواختی تعیین شده، دما و شار مورد نیاز روی بدن شخص را برای ماندن در محدوده ای حرارتی مطلوب ایجاد می کند. نتایج حاکی از آن است که جواب های حاصل از روش معکوس، علاوه بر برقراری شرایط آسایش حرارتی در سرتاسر فضای مسکونی، مشکلاتی از قبیل ناراضی ناشی از پدیده تابش نامتقارن را نیز ندارند.

gholamrezaimn@gmail.com
maerefat@modares.ac.ir
fkowsari@ut.ac.ir
a.zolfaghari@modares.ac.ir

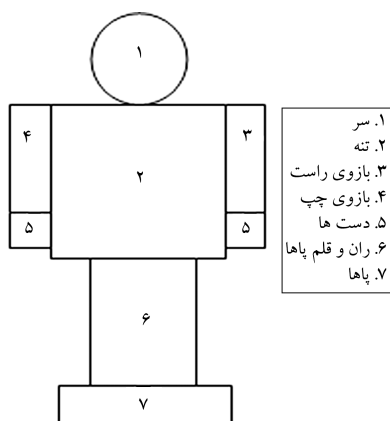
واژگان کلیدی: طراحی حرارتی معکوس، بدن انسان، اتاق مسکونی، انتقال حرارت
جابه جایی آزاد، انتقال حرارت تابشی، آسایش حرارتی.

مقدمه

به طور کلی می توان سیستم های تهویه مطبوع در ساختمان ها را به دو دسته: سیستم های جابه جایی و سیستم های تابشی تقسیم کرد.^[۱] در سیستم های جابه جایی، دمای هوا مبنای طراحی حرارتی ساختمان قرار می گیرد و تأسیسات گرمایشی و سرمایشی چنان طراحی می شوند که دمای هوای مطلوب برای ساکنان را فراهم کنند. در چنین سیستم هایی عمده ای انتقال حرارت بدن افراد با محیط از طریق سازوکار جابه جایی صورت می گیرد. در مقابل، سیستم های تابشی سیستم هایی هستند که با گرم یا سرد کردن سطوح اطراف ساکنان، حرارت مناسب را برایشان فراهم می کنند. در چنین سیستم هایی به جای کنترل دمای هوا، دمای سطوح دربرگیرنده ای شخص مبنای طراحی قرار می گیرد. بر این اساس، در این سیستم ها سازوکار تابش نقشی اساسی در تبادل حرارت میان افراد با محیط ایفا می کند.^[۲]

جریان هوا به عنوان معیار طراحی حرارتی ساختمان در نظر گرفته می شود، اما در سیستم های تابشی باید دمای تمام سطوح کنترلی اطراف شخص به عنوان مبنای طراحی لحاظ شود. هرچه تعداد این سطوح افزایش یابد، طراحی حرارتی ساختمان به روش مستقیم با دشواری بیشتری مواجه خواهد شد. در روش های معمول طراحی که «روش های طراحی مستقیم^۶» نامیده می شوند، فرایند طراحی مبتنی بر تخمین اولیه ای پارامترهای قابل کنترل سیستم است. پس از آن، احساس حرارتی^۷ افراد تحت شرایط مذکور محاسبه شده و اگر طراحی انجام شده مناسب نباشد، فرایند حدس و خطا تا رسیدن به طراحی مورد نظر ادامه می یابد.^[۱] از این رو، در شرایطی که تعداد پارامترهای کنترلی سیستم زیاد باشد، انجام محاسبات در روش های طراحی مستقیم بسیار زمان بر است. در این شرایط، استفاده از روش های طراحی معکوس^۸ تأثیر چشمگیری بر کاهش زمان محاسبات خواهد داشت. اگرچه استفاده از روش طراحی معکوس، سال هاست که در حل مسائل مختلف به کار گرفته شده است، ولی استفاده از این روش برای طراحی حرارتی محیط اطراف انسان، برای اولین بار

تاریخ: دریافت ۱۳۸۷/۲/۲۴، دایره ۱۳۸۷/۸/۶، پذیرش ۱۳۸۷/۱۱/۷.



شکل ۱. تقسیم‌بندی سطح بدن به قسمت‌های اصلی.

جدول ۱. شرایط آسایش حرارتی روی سطح بدن^[۴] و ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی موضعی^[۱۲].

کمیت	سر	تنه	بازوی چپ	بازوی راست	دست‌ها	پاها	کف پاها
دما (°C)	۳۶٫۱	۳۶٫۹	۲۷٫۴	۲۷٫۸	۳۵٫۹	۲۹٫۳	۳۰٫۶
شار حرارتی (Wm ^{-۲})	۱۰۳٫۷	۳۶٫۷	۲۸٫۱	۳۰٫۰	۹۶٫۱	۳۷٫۸	۴۹٫۹
h _i (Wm ^{-۱} k ^{-۱})	۳٫۵۹	۲٫۵۲	۳٫۷۶	۳٫۷۶	۴٫۴۹	۳٫۱۳	۴٫۶۴

این بخش‌ها، از تحقیقات دیگر محققین استخراج شده^[۴] و به همراه ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی موضعی برای بخش‌های مذکور^[۱۲] در جدول ۱ آمده است.

فرمول‌بندی ریاضی مسئله

مدل‌سازی ریاضی در این مسئله، نوشتن معادله‌ی تعادل حرارتی برای هرکدام از بخش‌های بدن را شامل می‌شود. برای این منظور، معادلات مربوط به انتقال حرارت جابه‌جایی و تابشی روی بدن شخص چنین نوشته می‌شود:^[۱۲]

$$Q_{i,rad} = \sum_{j=1}^N S_i \varepsilon_i B_{ij} \sigma (T_i^* - T_j^*) \quad (۱)$$

$$Q_{i,conv} = S_i h_i (T_i - T_{AIR,i}) \quad (۲)$$

اتلاف حرارت کل از هر قسمت بدن، به صورت مجموع انتقال حرارت جابه‌جایی و تابشی است:

$$Q_i = Q_{i,rad} + Q_{i,conv} \quad (۳)$$

برای مدل‌کردن انتقال حرارت تابشی، از روش «ضرایب جذب^[۱۱]» استفاده شد.^[۱۳] ضرایب جذب (B_{ij}) از ترکیب ضرایب دید و ضرایب انتشار سطوح، با حل دستگاه معادلات خطی ۴ به دست می‌آید:^[۱۴]

$$B_{ij} = \varepsilon_j F_{ij} + \sum_k \rho_k F_{ik} B_{kj}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (۴)$$

به طوری که $\varepsilon_j F_{ij}$ کسری از شار تابشی منتشره از سطح i ام است که به‌طور مستقیم توسط سطح j ام جذب می‌شود؛ نیز کسری از شار تابشی منتشره

در سال ۲۰۰۴ مطرح شد.^[۴] از این روش به منظور طراحی شرایط آسایش حرارتی برای سرنشین خودرو استفاده شد. با این وجود هنوز گزارشی مبنی بر استفاده از روش طراحی معکوس برای طراحی حرارتی یک اتاق مسکونی در دست نیست.

در نوشتار حاضر، سعی شده است که با تکیه بر تحقیقات قبلی،^[۴] پارامترهای حرارتی یک اتاق مسکونی دارای سیستم تابشی چنان طراحی شود که شرایط آسایش حرارتی برای افراد داخل اتاق فراهم شود. برای این منظور، از نوعی روش طراحی معکوس برای طراحی حرارتی فضای مسکونی استفاده می‌شود. در روش معکوس به جای فرایند حدس و خطا در پارامترهای طراحی، شار حرارتی لازم برای بخش‌های مختلف بدن به‌منظور دست‌یابی به شرایط آسایش حرارتی به‌عنوان معیار طراحی در نظر گرفته می‌شود و سپس با استفاده از یک الگوریتم معکوس و بدون حدس و خطا، پارامترهای طراحی به‌گونه‌ی تعیین می‌شوند که توزیع دما و شار تعیین شده روی بدن شخص را با دقت مورد نظر ایجاد کنند. از آنجا که در این روش شار حرارتی لازم برای بخش‌های مختلف بدن نیاز است، باید از نتایج تجربی موجود در این زمینه استفاده کرد.^[۴] البته باید توجه داشت که استفاده از روش‌های معکوس منجر به تولید دستگاه معادلاتی می‌شوند که به‌شدت بدووضع‌اند به طوری که برای رسیدن به یک جواب مفید از این دستگاه معادلات، از روش‌های منظم‌سازی استفاده می‌شود.^[۵] اولین بار محققین از یک روش منظم‌سازی برای طراحی تابشی معکوس محفظه‌ی با سطوح خاکستری استفاده کردند.^[۶] پس از آن افراد زیادی با استفاده از روش‌های معکوس مختلف، مسئله‌ی انتقال حرارت تابشی درون یک محفظه را مورد بررسی قرار دادند.^[۹-۷]

در تحقیق حاضر در نظر داریم با استفاده از روش معکوس، شرایط حرارتی (دمای دیوارها و دمای هوا) در یک اتاق مسکونی با سیستم تابشی را به‌گونه‌ی طراحی کنیم که شرایط حرارتی از پیش تعیین شده روی سطح بدن شخص مستقر در اتاق برآورده شود.

فضای نمونه

در تحقیق حاضر، به‌منظور استفاده از روش معکوس در طراحی دمای فضای مسکونی، اتاقی مکعب‌مستطیل شکل با طول ۲٫۹۵، عرض ۲٫۹۵ و ارتفاع ۲٫۴ متر به‌عنوان فضای نمونه در نظر گرفته شد. ضرایب دید بخش‌های مختلف بدن یک شخص نشسته نسبت به یکدیگر، و نیز نسبت به سطوح جانبی اتاق از نتایج تحقیقات انجام‌شده‌ی قبلی^[۱۱] در شرایط مشابه استخراج شده است. ضرایب صدور و انعکاس همه‌ی سطوح، ثابت و به‌ترتیب برابر با ۰٫۹ و ۰٫۱ است. با این فرض که از سیستم تهویه‌ی مطبوع تابشی (سرمایشی یا گرمایشی) برای برقراری آسایش حرارتی ساکنان استفاده شود، باید دمای سطوح جانبی اتاق (۶ سطح) و نیز دمای هوا به‌عنوان پارامترهای طراحی لحاظ شود. مطابق استاندارد انجمن تأسیساتی آمریکا^۹ در سیستم‌های تابشی سرعت جریان هوا ناچیز و حدود ۰٫۱۵m/s است.^[۱۱] در این شرایط می‌توان ضریب جابه‌جایی حرارت را برای بدن و نیز سطوح اتاق ثابت فرض کرد.^[۱۱] همچنین میزان رطوبت نسبی ۵۰٪ و طبق استاندارد، متوسط میزان مقاومت حرارتی^{۱۰} پوشش افراد در فضاهای مسکونی حدود ۰٫۱۲۵m^۲K/W و نیز آهنگ سوخت‌وساز افراد در شرایط استراحت حدود ۵۸W/m^۲ است.^[۱۱] در تحقیق حاضر، سطح بدن به هفت بخش اصلی - سر، تنه، بازوی چپ، بازوی راست، پاها، و کف پاها - تقسیم شده است که شمایی نمادین از این تقسیم‌بندی در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین توزیع دما و شار حرارتی مطلوب برای هرکدام از

بسیاری توسط افراد مختلف ارائه شده است^[۱۵] ولی از آنجا که روش منظم‌سازی تیخونوف در مقایسه با سایر روش‌ها، مستلزم زمان محاسباتی کم‌تری است، در اینجا از روش منظم‌سازی تیخونوف مرتبه اول^[۱۵] برای حل مسئله استفاده شده است.^[۱۶] تابع هدف (ϕ) در این روش چنین تعریف می‌شود:

$$\phi(E) = \left(\|AE - b\|_2^2 + \alpha \|L(E - E_0)\|_2^2 \right) \quad (8)$$

به طوری که E_0 حدس اولیه برای بردار جواب است که در ادامه‌ی کار برابر صفر فرض می‌شود. ماتریس L تقریب گسسته از عملگر مشتق مرتبه اول و α پارامتر منظم‌سازی تیخونوف مرتبه اول هستند. ماتریس L یک ماتریس دوقطری است که چنین تعریف می‌شود:

$$L = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

برای کمینه‌کردن تابع هدف ϕ از طرفین رابطه‌ی ۸ برحسب بردار E یک بار مشتق می‌گیریم و رابطه‌ی حاصله را برابر صفر قرار می‌دهیم:

$$\frac{\partial \phi^{set}}{\partial E} = 0 \quad (10)$$

با اعمال مشتق‌گیری معادله‌ی ۱۰، رابطه‌ی نهایی به صورت معادله‌ی ۱۱ به دست می‌آید:

$$\left(A^T A + \alpha L^T L \right) E = A^T b \quad (11)$$

دستگاه معادله‌ی ۱۱ یک دستگاه معادله‌ی خوش‌وضع بوده که با روش‌های معمول حل دستگاه معادلات، قابل حل است. به طوری که α وزن جمله‌ی خطای عمودی است که آگاهانه برای پایدارکردن مسئله وارد شده است. بنابراین انتخاب مطلوب α به گونه‌یی که هم مسئله پایدار شود و هم جواب‌ها از دقت مناسبی برخوردار باشند قسمت مهمی از آنالیز معکوس را به خود اختصاص می‌دهد. این کار در بخش بعد و با تعریف دو قید برای مسئله انجام می‌شود.

۲. درجه‌ی دقت و یکنواختی حل

الف) دقت حل

یکی از موارد مهمی که در حل به روش معکوس باید مورد توجه قرار گیرد، درجه‌ی دقت و یکنواختی حل است. پارامتر دقت حل، به صورت قدر مطلق اختلاف شار حرارتی تعیین شده روی هر قسمت بدن و شار حرارتی محاسبه‌شده از طریق آنالیز معکوس تعریف شده است:

$$\eta_i = |q_{i,direct} - q_{i,inverse}| \quad (12)$$

برای راحتی کار، بیشینه‌ی مقادیر فوق به عنوان معیاری برای دقت حل انتخاب شد. برای دقت حل یک قید به صورت $\eta_0 = \lambda W m^{-1}$ در نظر گرفته شد که نسبت به کارهای انجام‌شده‌ی پیشین، از دقت بالاتری برخوردار است.^[۳] با انتخاب قید اخیر، جواب‌های حاصله با شرط $\eta_{max} < \eta_0$ مورد قبول اند.

از سطح i ام است که از طریق انعکاس توسط سطوح دیگر به سطح j ام رسیده است. همچنین ضریب انعکاس سطوح است که به صورت $\rho_k = 1 - \varepsilon_k$ نوشته می‌شود N تعداد کل سطوح، شامل قسمت‌های مختلف بدن و سطوح اتاق است.

دستگاه معادلات

به طور کلی سطوح موجود در این مسئله به دو گروه تقسیم می‌شوند:

۱. سطوح تشکیل‌دهنده‌ی بدن، که روی آن‌ها دو شرط مرزی دما و شار حرارتی مشخص است و به عنوان سطوح طراحی یا DS^{۱۲} نام‌گذاری می‌شوند.

۲. سطوح اتاق که هیچ‌گونه شرط مرزی روی آن‌ها مشخص نیست و سطوح مجهول یا NS^{۱۳} نامیده می‌شوند.

برای تشکیل دستگاه معادلات، معادله‌ی تعادل حرارتی روی سطوح DS به صورت معادله‌ی ۵ نوشته می‌شود:

$$q_i = \varepsilon_i \sigma T_i^4 - \sum_j^{N_{DS}} \varepsilon_i B_{ij} \sigma T_{DS,i}^4 - \sum_j^{N_{NS}} \varepsilon_i B_{ij} \sigma T_{NS,j}^4 + h_i (T_i - T_{AIR,i}) \quad (5)$$

که با تفکیک معلومات و مجهولات از هم، می‌توان آن را مطابق معادله‌ی ۶ بازنویسی کرد:

$$- \sum_j^{N_{NS}} \varepsilon_i B_{ij} \sigma T_{NS,j}^4 - h_i T_{AIR,i} = q_i - \varepsilon_i \sigma T_i^4 + \sum_j^{N_{DS}} \varepsilon_i B_{ij} \sigma T_{DS,j}^4 - h_i T_i \quad (6)$$

در ادامه، توزیع دمای مجهول هوا در اتاق یکنواخت فرض شد. با بسط معادله‌ی ۶ برای هر کدام از قسمت‌های بدن، دستگاه معادله‌ی ۷ حاصل می‌شود:

$$AE = b \quad (7)$$

به طوری که A ماتریس ضرایب، شامل اطلاعات هندسی و خصوصیات تابشی است، b بردار معلومات است که با توجه به معلوم بودن دو شرط مرزی دما و شار روی سطوح DS تشکیل می‌شود، و در نهایت E بردار جواب است که شامل دمای مجهول هوا و توان گسیل مجهول مربوط به سطوح NS است. نکته‌ی قابل توجه آن است که به جای در نظر گرفتن دمای سطوح اتاق به عنوان مجهولات، برای سهولت حل دستگاه معادلات، توان گسیل جسم سیاه^{۱۴} این سطوح به عنوان مجهول در نظر گرفته شده است.

توصیف روند حل

۱. حل دستگاه معادلات به روش منظم‌سازی

از آنجا که دستگاه معادله‌ی ۷ از نظر ریاضی بدوضع است، بنابراین جواب‌های این دستگاه به شرایط ورودی بسیار حساس است. برای حل این مشکل از روش‌های منظم‌سازی برای رسیدن به جواب‌های مفید استفاده می‌شود. روش‌های منظم‌سازی

ب) یکنواختی حل

به منظور استفاده عملی از نتایج حل معکوس در طراحی حرارتی محیط، لازم است اختلاف بین دماهای محاسبه شده برای سطوح اتاق و نیز دمای هوا از یک حد مجاز فراتر نباشد. برای رسیدن به این منظور، از عملگر مشتق مرتبه اول (L) برای یکنواختی بیشتر حل استفاده می شود. این عملگر اندازه اختلاف بین دماها را کنترل می کند تا از حد مجاز بیشتر نشوند. برای کمیت بخشیدن به مفهوم یکنواختی حل، پارامتر δ به عنوان انحراف معیار استاندارد دماهای محاسبه شده، شامل دمای دیوارهای اتاق و همین طور دمای هوا تعریف می شود. بر این اساس، $\delta = 7^\circ C$ به عنوان مرجعی برای یکنواختی حل لحاظ می شود.^[۲] از آنجا که به ازای هر مقدار پارامتر منظم سازی تنها یک جواب برای مسئله وجود دارد، استفاده از روش منظم سازی منجر به جوابی یکتا نمی شود. به همین دلیل با تعریف دو قید فیزیکی فوق سعی شد که با یافتن پارامتر منظم سازی مطلوب بر اساس ارضاشدن دو قید اخیر، یک جواب مطلوب برای دستگاه معادلات به دست آمده ارائه شود.

محاسبه‌ی شاخص احساس حرارتی افراد از مدل استاندارد فن‌گر استفاده می شود. در مدل فن‌گر، معادله‌ی بالانس انرژی برای بدن در شرایط پایا نوشته می شود و اختلاف میان تولید و اتلاف حرارت بدن، به عنوان عاملی تعیین کننده در شرایط حرارتی بدن تعریف می شود:^[۱]

$$PMV = \left[(M - W) - \frac{3.577 - 0.0275(M - W) - t_o}{R_t} - 3.705(5.73 - 0.007(M - W) - p_a) - 0.173M(5.87 - p_a - 0.0014M(34 - t_{AIR})) - 0.42(M - W - 58) \right] \exp(-0.36M) + 0.28 \quad (14)$$

که در آن M آهنگ سوخت و ساز، W کار انجام شده توسط شخص، R_t مقاومت حرارتی کلی پوشش شخص و p_a فشار بخار هوا است. همچنین t_o نمایانگر دمای کارکرد است و از رابطه‌ی ۱۵ قابل محاسبه است:

$$t_o = \frac{ht_{AIR} + h_r \bar{t}_r}{h + h_r} \quad (15)$$

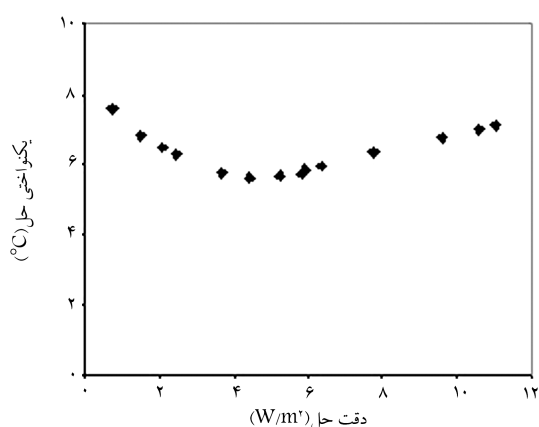
که در آن h و h_r به ترتیب ضرایب انتقال حرارت جابه جایی و تابشی و \bar{t}_r دمای متوسط تابش است.

شاخص PMV بیانگر احساس حرارتی افراد بوده و مقدار آن بین ۳- تا ۳+ است که هر عدد صحیح بین این دو مقدار معادل یک احساس مشخص حرارتی است، به طوری که ۳= خیلی گرم، ۲= گرم، ۱= کمی گرم، ۰= خنثی، -۱= کمی سرد، -۲= سرد، -۳= خیلی سرد.^[۱۱]

نتایج و بحث

۱. بررسی دقت و یکنواختی حل

چنان که پیش تر گفته شد، درجه‌ی دقت و یکنواختی حل از مهم ترین پارامترهایی هستند که در حل معکوس باید مورد توجه قرار گیرند. شکل ۲ تغییرات پارامتر یکنواختی حل δ را برحسب پارامتر دقت حل (η)، برای مقادیر مختلف پارامتر منظم سازی α نمایش می دهد. هر یک از نقاط روی نمودار، نشانگر یک جواب دستگاه معادلات است. چنان که در شکل ۲ نشان داده شده است، نمودار یکنواختی برحسب دقت، یک نقطه‌ی بهینه دارد که در آن حل مورد نظر با دقت $4.4 Wm^{-2}$ و یکنواختی $5.6^\circ C$ بهترین جواب ممکن از نظر ارضاء هم زمان دو قید اخیر



شکل ۲. دقت حل η بر حسب یکنواختی حل δ .

۳. تحلیل جواب های حاصل از حل معکوس به لحاظ شرایط آسایش حرارتی

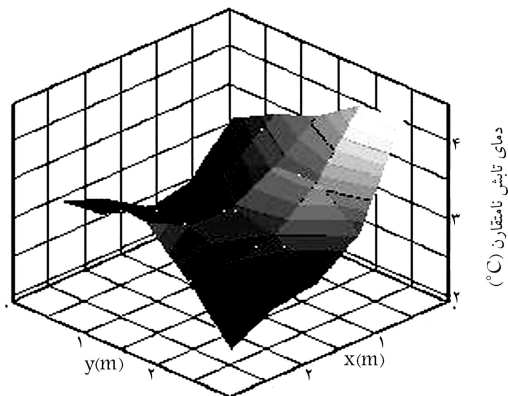
پس از این که با استفاده از روش معکوس یک دسته جواب مطلوب حاصل شد، بررسی اثرات برخی از عوامل ایجاد نارضایتی افراد که در حل معکوس لحاظ نشده ضرورت می یابد. در این بخش اثرات پارامتر تابش نامتقارن و نیز تأثیر محل نشستن افراد در اتاق بر حرارتی که احساس می کنند بررسی خواهد شد.

یکی از مهم ترین عوامل ایجاد نارضایتی حرارتی «تابش نامتقارن»^[۱۶] است. تابش نامتقارن می تواند باعث نارضایتی موضعی در افراد شود. اولین بار در سال ۱۹۸۵، محدودیت تابش نامتقارن بر آسایش حرارتی افراد درون یک اتاق به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت^[۱۸] و نتیجه‌ی آن به صورت نمودارهایی از درصد نارضایتی^[۱۷] افراد تحت آزمایش برحسب دمای تابش نامتقارن، برای دیوار و سقف سرد و گرم ارائه شد. نارضایتی ناشی از تابش نامتقارن هنگامی مطرح می شود که دمای متوسط تابش در دو طرف یک المان فرضی در اتاق از حد مجاز فراتر رود. دمای متوسط تابش در هر طرف یک المان را اصطلاحاً «دمای تابش صفحه‌ی^[۱۸]» می نامند و طبق تعریف عبارت است از:

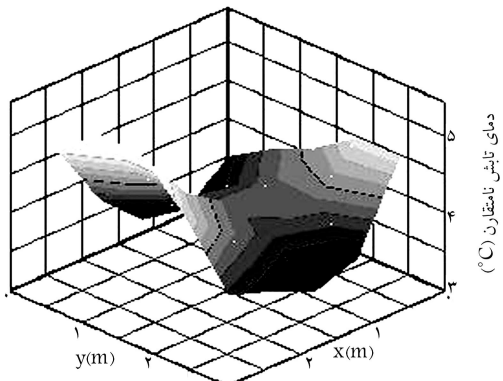
$$T_{pr} = \sqrt[4]{\sum_k F_{dA-k} T_k^4} \quad (13)$$

که در آن T_k دمای سطوح اتاق k ، F_{dA-k} ضریب دید یک طرف المان به سطوح اتاق است. دمای تابش نامتقارن^[۱۹] در یک محفظه در جهتی خاص، به صورت اختلاف دمای تابش صفحه‌ی در دو طرف یک المان کوچک عمود بر جهت مورد نظر تعریف می شود. طبق استانداردهای آسایش حرارتی و با در نظر گرفتن نارضایتی حداکثر ۵ درصدی افراد (طبق استاندارد ISO)^[۱۹]، دمای تابش نامتقارن نباید بیشتر از $4^\circ C$ شود^[۲۰] که البته این مقدار مربوط به بحرانی ترین شرایط نارضایتی افراد (سقف گرم) است.

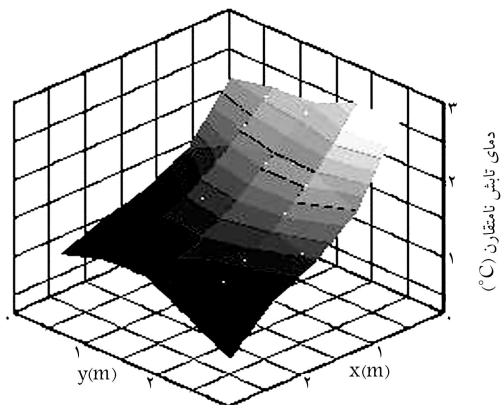
پس از بررسی تابش نامتقارن، پارامتر دیگری که باید مد نظر قرار گیرد، تأثیر محل نشستن افراد در نقاط مختلف اتاق بر احساس حرارتی آن ها است. در روش معکوس، حل بر اساس ایجاد شرایط حرارتی مطلوب برای شخص مستقر در وسط اتاق انجام گرفت ولی نکته‌ی که باید بررسی شود این است که آیا برای سایر نقاط استقرار افراد در اتاق نیز شرایط آسایش حرارتی برقرار خواهد بود یا خیر. به منظور بررسی این امر، شاخص احساس حرارتی افراد در سراسر اتاق محاسبه می شود. برای



الف) ارضای همزمان قیود دقت و یکنواختی؛



ب) ارضای قیود دقت؛



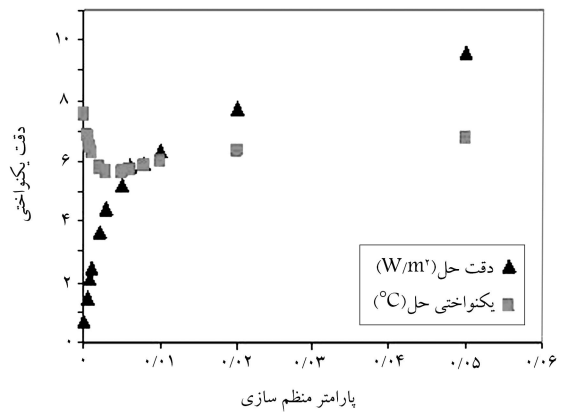
ج) ارضای همزمان قیود دقت، یکنواختی و کم‌ترین تابش نامتقارن از سقف گرم.

شکل ۴. توزیع تابش نامتقارن از سقف گرم برای طراحی ارائه شده.

است. در شکل ۳ روند تغییرات پارامترهای دقت و یکنواختی حل برحسب پارامتر منظم‌سازی، با جزئیات بیشتر ارائه شده است. چنان که مشاهده می‌شود، پارامتر دقت حل با افزایش پارامتر منظم‌سازی، روند کاهشی از خود نشان می‌دهد؛ این در حالی است که پارامتر یکنواختی حل برحسب پارامتر منظم‌سازی، یک نقطه‌ی مطلوب دارد. با استفاده از این واقعیت دیده می‌شود که اگر صرفاً قید دقت حل را مد نظر قرار دهیم و از قید یکنواختی حل صرف‌نظر کنیم، با حل مطلوب براساس قید دقت، دست‌یابی به جواب‌هایی با دقت 0.06 Wm^{-2} نیز امکان‌پذیر است. نتایج محاسبه‌شده دمای دیوارها و دمای هوا مربوط به حل مطلوب با دو قید دقت و یکنواختی حل و نیز حل مطلوب فقط با قید دقت، در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، دمای دیوارها و دمای هوای به دست آمده، در محدوده‌ی فیزیکی قابل قبول برای طراحی قرار دارد و می‌تواند به‌عنوان پیش‌طرحی مناسب برای طراحی حرارتی یک اتاق مسکونی به کار گرفته شود.

۲. بررسی میزان ناراضیاتی ناشی از تابش نامتقارن

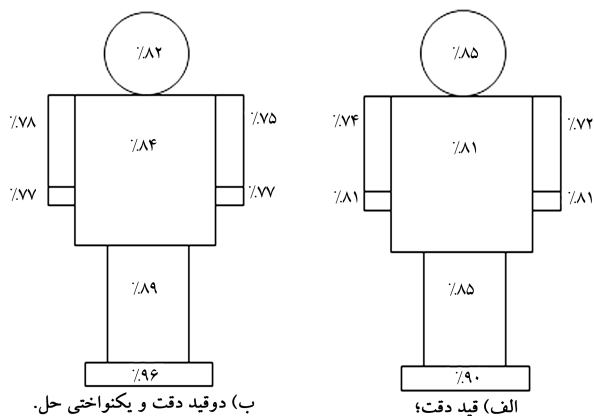
در تحقیق حاضر طرح‌های ارائه‌شده با اعمال قیود دقت و یکنواختی حل، که در جدول ۲ قابل مشاهده است، از نظر احتمال ایجاد تابش نامتقارن از سقف گرم مورد بررسی قرار گرفتند. بدین منظور تابش نامتقارن از سقف گرم برای مکان‌های مختلف نشستن شخص در کف اتاق محاسبه شد که نتایج حاصله به‌صورت توزیع تابش نامتقارن از سقف گرم روی کف اتاق در شکل‌های ۴ الف و ۴ ب قابل مشاهده است. چنان که مشاهده می‌شود در هر دو حالت، ناراضیاتی حرارتی ناشی از تابش نامتقارن کم‌تر از ۵٪ است که این میزان طبق استانداردهای آسایش حرارتی قابل قبول تلقی می‌شود.^[۱۹] نتیجه دیگری که از شکل‌های ۴ الف و ۴ ب می‌توان گرفت این است که طراحی انجام‌شده با اعمال هم‌زمان قیود دقت و یکنواختی حل، نسبت به



شکل ۳. تغییرات دقت و یکنواختی حل برحسب پارامتر منظم‌سازی α .

جدول ۲. نتایج مطلوب به دست آمده با قیودهای مختلف.

پارامترهای طراحی	دمای طراحی به دست آمده از روش معکوس ($^{\circ}\text{C}$)							شرایط حل		
	دقت یکنواختی ($^{\circ}\text{C}$)	دقت (Wm^{-2})	کف	سقف	دیوار روبرو	دیوار پشت	دیوار چپ		دیوار راست	هوا
منظم‌سازی 0.003	5.6	4.4	27.7	34.2	25.7	18.0	23.7	16	25.5	قید دقت و یکنواختی حل
10^{-6}	7.9	0.06	27.9	36.3	17.5	13.4	35.5	24.3	23.6	قید دقت به تنهایی
0.01	6.2	5.6	29.0	32.1	28.6	23.0	21.1	13.5	24.5	قیود دقت، یکنواختی و عدم تابش نامتقارن



شکل ۶. سهم تابش در هر قسمت بدن برای حل مطلوب.

طراحی انجام شده با اعمال قید دقت به تنهایی، تابش نامتقارن کم‌تری ایجاد می‌کند. از طرف دیگر اعمال قید یکنواختی حل باعث کاهش دقت حل می‌شود؛ بدین منظور و برای ارائه‌ی حلی که هر سه قید دقت، یکنواختی و کم‌ترین تابش نامتقارن از سقف گرم را ارضاء کند، تابش نامتقارن بحرانی از سقف گرم به‌عنوان یک قید اضافی بر دسته جواب‌های به دست آمده با قیود دقت و یکنواختی اعمال شد و جوابی مطلوب براساس ارضاء هر سه قید ذکر شده به دست آمد (جدول ۲). توزیع تابش نامتقارن از سقف گرم برای حل ارائه‌شده براساس ارضاء هم‌زمان سه قید دقت، یکنواختی و کم‌ترین تابش نامتقارن از سقف گرم در شکل ۴ ج آمده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، تابش نامتقارن از سقف گرم در این حالت نسبت به شکل‌های ۴ الف و ۴ ب به میزان قابل توجهی کم‌تر است.

۳. توزیع شاخص احساس حرارتی افراد در نقاط مختلف اتاق

چنان‌که پیش‌تر گفته شد، در تحقیق حاضر حل معکوس براساس برقراری شرایط حرارتی مطلوب و احساس حرارتی خنثی ($PMV=0$) برای شخص مستقر در وسط اتاق انجام گرفت. اما برای طراحی یک فضای مطلوب به‌لحاظ حرارتی، باید در تمام نقاط این فضا احساس حرارتی افراد در محدوده‌ی مجاز قرار داشته باشد. برای بررسی این امر، توزیع شاخص احساس حرارتی افراد (PMV) در نقاط مختلف اتاق براساس نتایج حاصل از حل معکوس مورد توجه قرار گرفت. طبق استانداردهای تهویه مطبوع، $PMV=0$ بیان‌گر احساس حرارتی خنثی است و محدوده‌ی مجاز برای طراحی حرارتی فضاهای مسکونی و اداری این است که شاخص PMV بین -0.5 تا 0.5 قرار داشته باشد. در شکل ۵ توزیع شاخص احساس حرارتی به‌ازای استقرار افراد در نقاط مختلف اتاق نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که اگرچه طراحی برای شخص مستقر در وسط اتاق انجام گرفته، مقدار شاخص احساس حرارتی افراد در تمام نقاط اتاق از محدوده‌ی مجاز فراتر نمی‌رود.

۴. سهم انتقال حرارت تابشی در هر قسمت بدن

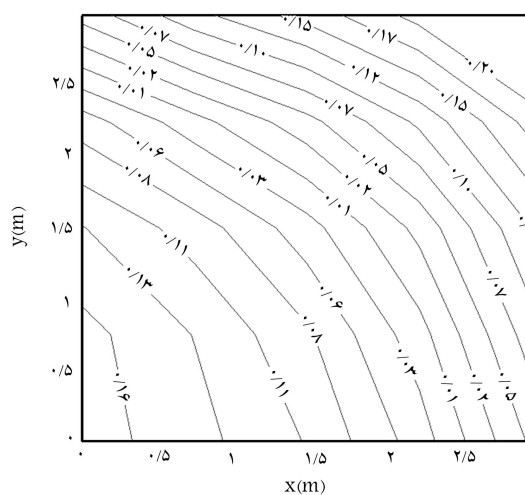
در انتها، به‌منظور توصیف حل به دست آمده، سهم هرکدام از سازوکارهای انتقال حرارت روی قسمت‌های مختلف بدن محاسبه می‌شود. برای این منظور پارامتر R به‌صورت درصد سهم اتلاف تابشی از هر قسمت بدن به کل اتلاف حرارت (تابشی)

$$R(\%) = \frac{|q_{rad}|}{|q_{rad}| + |q_{conv}|} \times 100 \quad (16)$$

نتایج محاسبه‌ی پارامتر R روی قسمت‌های مختلف بدن برای حل‌های به دست آمده با در نظر گرفتن قید دقت و نیز دو قید دقت و یکنواختی حل، به‌ترتیب در شکل‌های ۶ الف و ۶ ب نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، اگر سطوح اطراف شخص به‌عنوان پارامتر طراحی لحاظ شود (همانند سیستم‌های گرمایش و سرمایش تابشی)، قسمت عمده‌ی اتلاف حرارت از همه‌ی بخش‌های بدن با سازوکار تابش خواهد بود. این امر توسط محققین دیگری نیز گزارش شده است.^[۱۲] اما استفاده از این حقیقت می‌تواند در طراحی سیستم‌های گرمایش و سرمایش تابشی به طراحان کمک کند.

نتیجه‌گیری

طراحی حرارتی یک اتاق مسکونی (محاسبه‌ی دمای دیوارها و دمای هوا) به‌منظور رسیدن به شرایط مطلوب حرارتی از پیش تعیین شده روی بدن انسان، با روش معکوس انجام شد. به‌دلیل استفاده از روش منظم‌سازی تیخونوف، یک دسته جواب برای مسئله به دست آمد که همگی آنها شرایط حرارتی ذکر شده روی بدن شخص را با حاشیه دقت تعریف شده ارضاء می‌کنند. دسته جواب‌های به‌دست آمده از نظر دقت، یکنواختی و تابش نامتقارن مورد بررسی قرار گرفتند و در نهایت از میان آنها سه دسته جواب براساس قیدهای دقت، یکنواختی حل و کم‌ترین تابش نامتقارن از سقف گرم انتخاب شدند. نتایج حاکی از آن است که با استفاده از قید یکنواختی $\delta = 7^\circ C$ در طراحی حرارتی فضاهای مسکونی به‌روش معکوس، نارضایتی ناشی از پدیده‌ی تابش نامتقارن ناچیز است. همچنین انجام طراحی بر مبنای ایجاد شرایط مطلوب حرارتی برای شخص نشسته در وسط اتاق، می‌تواند معیار مناسبی برای طراحی حرارتی فضای مسکونی به‌روش معکوس محسوب شود. زیرا در این شرایط احساس حرارتی برای افراد مستقر در سرتاسر فضای اتاق در محدوده‌ی مجاز طراحی ($-0.5 < PMV < 0.5$) باقی خواهد ماند. در نهایت می‌توان چنین نتیجه گرفت که طراحی حرارتی محیط‌های مسکونی به‌روش معکوس، بدون نیاز به فرایند حدس و خطا، منجر به دسته جواب‌هایی می‌شود که ضمن برقراری شرایط آسایش حرارتی در سرتاسر فضا، مشکلاتی از قبیل پدیده‌ی تابش نامتقارن در آن دیده نمی‌شود. از آنجا که روش به‌کار گرفته شده در تحقیق حاضر، نوعی طراحی حرارتی



شکل ۵. توزیع شاخص احساس حرارتی افراد (PMV) به‌ازای استقرار فرد در نقاط مختلف اتاق.

PMV : میانگین رأی افراد (شاخص احساس حرارتی افراد)
 q : شار حرارت (W/m^2)
 R_t : مقاومت حرارتی کلی پوشش افراد ($m^2 K/W$)
 S : مساحت (m^2)
 T : دمای مطلق (K)
 \bar{T}_r : دمای متوسط تابش ($^{\circ} C$)
 W : نرخ کار (W/m^2)

نمادهای یونانی

α : پارامتر منظم‌سازی (بی‌بعد)
 δ : پارامتر یکنواختی حل ($^{\circ} C$)
 ε : ضریب صدور تابش (بی‌بعد)
 ϕ : تابع هدف
 η : پارامتر دقت حل (W/m^2)
 ρ : ضریب انعکاس تابش (بی‌بعد)
 σ : ثابت استیفن بولتزمن ($5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$)

زیرنویس‌ها

air : مربوط به هوا
 i : مربوط به یکی از سطوح طراحی (اجزای بدن)

محیط بر مبنای «طراحی سطوح داخلی $^{\circ}$ » محسوب می‌شود، پس از دست‌یابی به طراحی که شرایط مطلوب حرارتی را برای ساکنان فضای مسکونی ایجاد می‌کند، طراح می‌تواند با توجه به شرایط خارجی اتاق، عواملی همچون میزان عایق‌بندی و جنس جداره‌های ساختمان و همین‌طور بار سیستم سرمایشی یا گرمایشی را به‌ نحو مقتضی طراحی کند.

فهرست علائم

A : ماتریس ضرایب دستگاه معادلات
 A^T : ترانپوخته‌ی ماتریس A
 b : بردار ثابت‌های دستگاه معادلات
 $B_i z$: ضریب جذب گبهارت سطح i به سطح z
 E : بردار جواب دستگاه معادلات
 $F_i z$: ضریب شکل تشعشعی سطح i به سطح z
 h : ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ($W/m^2 K$)
 h_r : ضریب انتقال حرارت تابشی ($W/m^2 K$)
 L : عملگر گسسته مشتق مرتبه یک
 M : آهنگ سوخت‌وساز (W/m^2)

پانویس

1. thermal comfort
2. Ill-posed
3. inverse modeling
4. well-posed
5. tikhonov regularization
6. direct design
7. thermal sensation
8. inverse design
9. ASHRAE
10. thermal resistance
11. absorption factors
12. design surface
13. no specification
14. black body emissive power
15. first-order tikhonov regularization method
16. asymmetric radiation
17. percentage of dissatisfied
18. plane radiant temperature
19. radiant temperature asymmetry
20. internal surface design

منابع

1. Watson, R.D., and Chapman, K.S., *Radiant Heating and Cooling Handbook*, McGraw-Hill, New York (2001).
2. Banhidi, L.J., *Radiant Heating Systems-Design and Applications*, Pergamon Press, Oxford (1991).
3. Leduc, G.; Monchoux, F., and Thellier, F., "Inverse thermal design in human thermal environment", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **47**, pp. 3291-3300 (2004).
4. Thellier, F.; Corider, A., and Monchoux, F., "The analysis of thermal comfort requirements through the simulation of an occupied building", *Ergonomics*, **37**(5), pp. 817-825 (1994).
5. Hansen, P.C., *Rank-Deficient and Discrete Ill-Posed Problems, Numerical Aspects of Linear Inversion*, SIAM, Philadelphia (1998).
6. Harutunian, V.; Morales, J.C., and Howell, J.R., "Radiation exchange within an enclosure of diffuse-gray surfaces: The inverse problem", *National Heat Transfer Conference*, ASME (1995).
7. Sarvari, S.M.H.; Mansouri, S.H., and Howell, J.R., "Inverse design of three-dimensional enclosures with transparent and absorbing-emitting media using an optimization technique", *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, **30**, pp. 149-162 (2003).
8. Pourshaghaghay, A.; Pooladvand, K.; Kowsary, F., and Karimi-zand, K., "An inverse radiation boundary design problem for an enclosure filled with an emitting, absorbing, and scattering media", *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, **33**, pp. 800-810 (2006).
9. Daun, K.J., and Howell, J.R., "Inverse design methods for radiative transfer systems", *Journal of Quantita-*

- tive Spectroscopy and Radiative Transfer*, **93**, pp. 43-60 (2005).
10. Sorensen, D.N., "Radiation between segments of the seated human body", *The 8th International Conference on Air Distribution in Rooms*, Copenhagen, Denmark (2002).
 11. ASHRAE, *ASHRAE Handbook fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-conditioning Engineers Inc., Atlanta (2001).
 12. Sorensen, D.N., and Voigt, L.K., "Modeling flow and heat transfer around a seated human body by computational fluid dynamics", *Building and Environment*, **38**, pp. 753-762 (2003).
 13. Gebhart, B., *Heat transfer*, McGraw-Hill, New York (1971).
 14. Seigel, R., and Howell, J.R., *Thermal Radiation Heat Transfer*, Fourth Edition, Taylor and Francis, New York (2002).
 15. Howell, J.R.; Ezekoye, O.A., and Morales, J.C., "Inverse design model for radiative heat transfer", *Journal of Heat Transfer*, **122**, pp. 492-502 (2000).
 16. Daun, K.; Franca, F.; Larsen, M., and Howell, J.R., "Comparison of methods for inverse design of radiant enclosures", *Journal of Heat Transfer*, **128**, pp. 269-282 (2006).
 17. Awbi, H.B., *Ventilation of Buildings*, E & FN Spon, New York (1998).
 18. Fanger, P.O.; Ipsen, B.M.; Langkilde, G.; Olesen, B.W.; Christensen, N.K., and Tanabe, S., "Comfort limits for asymmetric thermal radiation", *Energy and Buildings*, **8**, pp. 225-236 (1985).
 19. ISO 7730, Moderate thermal environments-Determination of the PMV and PPD indices and specification of conditions for thermal comfort, International Standards Organization, Geneva (1984).
 20. Fanger, P.O.; Banhidi, L.; Olesen, B.W., and Langkilde, G., "Comfort limits for heated ceilings", *ASHRAE Trans*, **86**(2), pp. 141-156 (1980).
 21. Fanger, P.O., *Thermal Comfort Analysis and Application in Environmental Engineering*, McGraw-Hill, New York (1970).